

Основные электрофизические характеристики природной трехфазной дисперсной системы «грозовое облако–земля»

М. И. Баранов

Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Молния»
Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»,
г. Харьков, 61013, Украина, e-mail: baranovmi49@gmail.com

Поступила в редакцию 23.12.2021

После доработки 27.07.2022

Принята к публикации 03.08.2022

Приведены результаты инженерного расчета основных электрофизических характеристик трехфазной дисперсной системы земной тропосферы «грозовое облако–земля», в облаке которой несущая газообразная воздушная фаза содержит мелкие жидкие капли воды и мелкие твердые диэлектрические частицы. Полученные результаты будут способствовать прогнозированию грозовой обстановки в тропосфере Земли при минимальной исходной метеорологической информации, дальнейшему развитию физики линейной молнии и решению проблемы молниезащиты воздушных и наземных объектов и обслуживающего их персонала.

Ключевые слова: заряд, потенциал и энергия грозового облака, ток разряда облака на землю, молния, расчет

УДК 621.3.015.52:541.182.2: 537.311.8

<https://doi.org/10.52577/eom.2023.59.6.50>

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на значительные успехи мирового научного сообщества в области многолетнего теоретического и экспериментального изучения атмосферного электричества, до сих пор проблемной задачей остается та, которая связана с определением основных электрофизических характеристик формируемого в тропосфере Земли многофазного грозового облака, представляющего для оказавшихся вблизи него в околоземном воздушном пространстве объектов авиационной и ракетно-космической техники, а также наземных стратегических технических объектов (например, сооружений атомных и тепловых электрических станций) серьезную потенциальную электромагнитную угрозу [1–3]. К указанным характеристикам грозового облака, возникающего в земной тропосфере, согласно [4], из кучево-дождевого облака при выполнении ряда критических условий, следует отнести: накопленный в облаке суммарный электрический заряд q_{Σ} ; электрический потенциал φ_r в объеме облака; электрическую энергию W_0 , запасаемую мелкодисперсными включениями облака; вероятные амплитудно-временные параметры (АВП) импульсного тока $i_L(t)$ линейной молнии в сильнооточном плазменном канале длинного воздушного искрового электрического разряда облака на землю (в защищаемый технический объект). От знания этих электрофизических характеристик во многом зависит прогноз инженеров и метеорологов о возможной электромагнитной угрозе для защищаемых наземных

объектов и летательных аппаратов, оказавшихся в зоне формирования, развития и действия такого электрически активного атмосферного облака. Умение расчетного оперативного определения указанных характеристик грозового облака позволяет прогнозировать грозовую опасность и обстановку в том или ином районе планеты Земля, а также определенным образом расширяет наши знания в области атмосферного электричества и физики длинного воздушного искрового разряда (молнии) и последствий воздействия подобного сильнооточного атмосферного искрового разряда на защищаемые технические объекты с обслуживающим их персоналом и окружающую эти объекты среду. Поэтому рассмотрение новых электрофизических подходов к решению указанных проблемных вопросов в области атмосферного электричества является актуальной в мире научно-технической задачей.

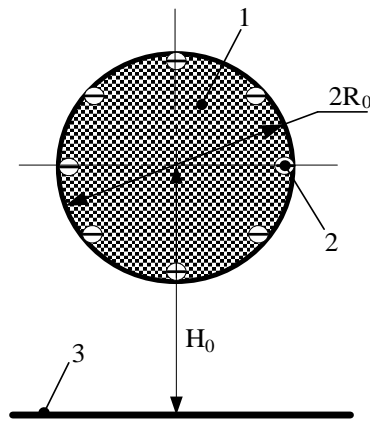
ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим крупномасштабную область тропосферы Земли (нижнюю часть земной атмосферы высотой до 11 км) в умеренных широтах в теплый весенне-летний период года, когда возможно образование кучево-дождевых и соответственно грозовых облаков [1–4]. Считаем, что в данной воздушной области и соответственно в рассматриваемом нами грозовом облаке присутствуют [3–5]: во-первых, восходящие теплые и нисходящие холодные воздушные потоки; во-вторых, водяной пар и продукты его конденсации – мелкие жидкие

капли воды, возникающие за счет испарения влаги с земных сухопутных, речных и морских поверхностей; в-третьих, мелкие твердые диэлектрические частицы (например, из диоксида кремния и иных соединений), поднятые вверх воздушными потоками как с земной суши, так и с дымовыми естественными (частицы вулканического происхождения) и искусственными (частицы промышленного происхождения) выбросами. При выборе количественных показателей (геометрических размеров и концентрации) для указанных жидких капель воды и твердых диэлектрических частиц будем основываться на экспериментальных данных, приведенных в [3, 4, 6] и характерных для реальных грозовых облаков. При этом одним из интегральных критериев достоверности выбора расчетных численных значений этих показателей будет являться усредненная объемная плотность электрического заряда σ_V (Кл/м³) в атмосферном грозовом облаке, обычно регистрируемая опытным путем с помощью аппаратуры летающих электрофизических лабораторий [2, 4]. Согласно данным из [4], средний r_w жидких капель воды для грозового облака составляет (2,5–5) мкм, а их усредненная объемная плотность (концентрация) – $N_w \approx (1–10) \times 10^8$ м⁻³. Что касается твердых диэлектрических частиц, присутствующих в атмосферном грозовом облаке, то их средние размеры соизмеримы с размерами жидких капель воды, а их усредненная объемная плотность (концентрация) N_d может изменяться в широком диапазоне: от $(1–5) \times 10^6$ м⁻³ для кучево-дождевых облаков до $(1–10) \times 10^8$ м⁻³ для газо-дымовых облаков вулканического происхождения [4, 6].

Пусть в рассматриваемом грозовом облаке усредненная объемная плотность сферических капель воды радиусом $r_w \approx 5$ мкм численно составляет $N_w \approx 10^8$ м⁻³, а круглых твердых диэлектрических частиц радиусом $r_d \approx 5$ мкм – $N_d \approx 5 \times 10^6$ м⁻³ [4, 5]. Указанная концентрация N_d твердых диэлектрических микровключений в атмосферном грозовом облаке принимается в 10 раз меньшей по сравнению с аналогичным параметром в [7], где при расчетной оценке энергетических характеристик грозового облака не было учтено влияние присутствия внутри него заряжающихся в теплых восходящих воздушных потоках круглых жидких микровключений воды. В этой связи грозовое облако в рассматриваемом приближении можно считать природной микрогетерогенной трехфазной дисперсной системой, в которой мелкие жидкие капли воды (фаза 1) и мелкие твердые диэлектрические частицы (фаза 2) находятся во взвешенном состоянии в несущей газообразной воздушной

среде (фаза 3) [8]. Возможные физические механизмы биполярной электризации в исследуемой области земной атмосферы мелких капель воды радиусом r_w и мелких твердых диэлектрических частиц радиусом r_d были рассмотрены ранее в [4, 5]. Согласно этим механизмам электризации, жидкие микрокапли воды радиусом r_w в атмосферных теплых восходящих воздушных потоках могут получать отрицательный электрический заряд, равный по модулю $q_w \approx 4\pi\epsilon_0 r_w \phi_g$, а твердые диэлектрические микрочастицы радиусом r_d – аналогичный электрический заряд $q_d \approx 4\pi\epsilon_0 r_d \phi_g$, где $\phi_g \approx 0,25$ В – модуль электрокинетического потенциала Гельмгольца [4], а $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная [9]. Из приведенных расчетных соотношений для q_w и q_d следует, что в рассматриваемом случае при $r_w \approx r_d \approx 5$ мкм отрицательный заряд электризации мелких жидких капель воды и мелких твердых диэлектрических частиц в грозовом облаке по модулю будет численно составлять $q_w \approx q_d \approx 1,39 \times 10^{-16}$ Кл. Видно, что этот заряд примерно в 870 раз превышает элементарный заряд e_0 электрона, численно равный по модулю $e_0 \approx 1,602 \times 10^{-19}$ Кл [9]. Примем, что исходный объем V_r грозового облака в первом приближении представляет собой прямоугольную призму с габаритными размерами в горизонтальном основании 1000 м на 1000 м и высотой 3000 м ($V_r \approx 3 \times 10^9$ м³), центр которой расположен на высоте $H_0 \approx 3000$ м над плоской поверхностью земли. Согласно [3, 4], именно с подобных высот начинается в земной тропосфере активное образование облачных зарядов. Для выполнения приближенного математического моделирования электрофизических процессов в грозовом облаке остановимся на его упрощенной расчетной модели, представляющей сферу наружным радиусом R_0 , содержащую при $H_0 \approx 3000$ м равномерно распределенные по ее расчетному объему $V_0 = V_r = 4\pi R_0^3 / 3 = 3 \times 10^9$ м³ (при $R_0 \approx 895$ м) указанные электрически заряженные мелкодисперсные включения (см. рисунок). Пусть в воздушном промежутке с наименьшей длиной l_c рассматриваемой системы «грозовое облако–земля» приближенно выполняются нормальные атмосферные условия (давление воздуха составляет $1,013 \times 10^5$ Па, а его температура равна 0 °С [9]). С учетом принятых допущений в приближенном виде требуется расчетным путем определить искомые значения накопленного в упрощенной модели грозового облака суммарного электрического заряда q_Σ , электрического потенциала ϕ_r в сферическом объеме



Схематический вид упрощенной расчетной модели отрицательно заряженного грозового облака сферической формы наружным радиусом R_0 , размещенного на высоте H_0 над плоской земной поверхностью неограниченных размеров (1 – трехфазное облако; 2 – электрон; 3 – поверхность земли).

исследуемого мелкодисперсного облака, запасаемой рассматриваемым атмосферным облаком электрической энергии W_0 и АВП импульса тока $i_L(t)$ линейной молнии при длинном воздушном электрическом искровом разряде в указанной электростатической мелкодисперсной системе «грозовое облако–земля».

Цель статьи – инженерный расчет основных электрофизических характеристик (полного электрического заряда q_Σ облака, усредненной в облаке объемной плотности электрического заряда σ_V , электрического потенциала ϕ_r облака, запасаемой в облаке электрической энергии W_0 , удельной электрической энергии в облаке w_{0V} и АВП импульсного тока $i_L(t)$ электрического разряда облака на землю) принятой трехфазной мелкодисперсной системы земной тропосферы «грозовое облако–земля».

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ПОЛНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА q_Σ ГРОЗОВОГО ОБЛАКА

Учитывая принятую для тропосферы Земли упрощенную расчетную модель грозового облака, для суммарного электрического заряда q_Σ рассматриваемого атмосферного облака сферической формы, размещенного над землей (см. рисунок), можно записать следующее расчетное соотношение:

$$q_\Sigma = (q_w N_w + q_d N_d) V_0. \quad (1)$$

Из (1) при принятых исходных данных ($q_w \approx q_d \approx -1,39 \times 10^{-16}$ Кл, $N_w \approx 10^8$ м⁻³, $N_d \approx 5 \times 10^6$ м⁻³, $R_0 \approx 895$ м; $V_0 \approx V_r \approx 3 \times 10^9$ м³) следует, что в исследуемом случае значение полного отрицательного электрического заряда грозового облака численно составляет $q_\Sigma \approx -43,8$ Кл. Полученное по (1) расчетное численное значение суммарного электрического

заряда $q_\Sigma \approx -43,8$ Кл в принятом грозовом облаке полностью соответствует нормированному значению отрицательного заряда $q_L = -(50 \pm 10)$ Кл для короткого удара молнии с импульсным аperiodическим током электрического разряда временной формы 10 мкс/350 мкс в наземные технические объекты, удовлетворяющие III–IV уровням их молниезащиты по требованиям международного стандарта ИЕС 62305-1: 2010 [10, 11]. Кроме того, отметим, что расчетное численное значение усредненной объемной плотности электрического заряда σ_V в упрощенной расчетной модели грозового облака сферической формы, определяемое, согласно (1), как $\sigma_V = (q_w N_w + q_d N_d) \approx -1,46 \times 10^{-8}$ Кл/м³ и характеризующее степень его грозовой «зрелости», соответствует известным экспериментальным данным для среднего значения плотности объемного заряда $\sigma_V \approx \pm(0,3-3) \times 10^{-8}$ Кл/м³ в реальном грозовом облаке тропосферы Земли [3, 4]. Это обстоятельство может указывать на достоверность используемых нами количественных параметров для r_w , r_d , N_w и N_d .

Согласно приведенному выше аналитическому соотношению для среднего значения плотности объемного электрического заряда $\sigma_V = 4\pi\epsilon_0\phi_g(r_w N_w + r_d N_d)$ в облаке, вклад рассматриваемых наэлектризованных круглых твердых диэлектрических частиц в суммарный электрический заряд $q_\Sigma \approx \sigma_V V_0$ (при $V_0 \approx V_r \approx 3 \times 10^9$ м³) исследуемого грозового облака будет незначительным (не более 5%). В этой связи при используемой объемной плотности $N_d \approx 5 \times 10^6$ м⁻³ твердых диэлектрических частиц радиусом $r_d \approx 5$ мкм их влиянием в грозовом облаке, содержащем круглые жидкие капли воды с рассматриваемыми количественными параметрами ($r_w \approx 5$ мкм; $N_w \approx 10^8$ м⁻³), можно пренебрегать.

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА φ_r ГРОЗОВОГО ОБЛАКА

Используя для нахождения радиального распределения в принятой расчетной модели грозового облака электрического потенциала φ_r электрофизический подход, приведенный в [12], для искомого потенциала φ_r в грозовом облаке сферической формы с наружным радиусом R_0 получаем:

$$\varphi_r = q_\Sigma (3R_0^2 - r^2) / (8\pi\epsilon_0 R_0^3), \quad (2)$$

где r – текущий радиус в сферическом объеме исследуемого мелкодисперсного грозового облака.

Из (2) при $r = 0$ для электрического потенциала $\varphi_r|_{r=0} = \varphi_0$ в центре рассматриваемого трехфазного дисперсного грозового облака сферической конфигурации находим:

$$\varphi_0 = 3q_\Sigma / (8\pi\epsilon_0 R_0). \quad (3)$$

При $r = R_0$ из (2) для электрического потенциала $\varphi_r|_{r=R_0} = \varphi_R$ на наружной поверхности сферы принятой расчетной модели грозового облака вытекает следующее соотношение:

$$\varphi_R = q_\Sigma / (4\pi\epsilon_0 R_0). \quad (4)$$

Из (3) и (4) видно, что в центре рассматриваемого грозового облака электрический потенциал φ_0 в 1,5 раза превышает электрический потенциал φ_R , приобретаемый наружной сферической поверхностью исследуемой модели данного облака. Выявленный характер радиального распределения электрического потенциала φ_r в сферической модели грозового облака позволяет уточнить малоизученный на сегодня в области атмосферного электричества физический механизм зарядной «подпитки» плазменного канала длинного воздушного искрового электрического разряда грозового облака на землю или в защищаемый воздушный (наземный) технический объект [4]. При установленном выше радиальном распределении в принятой расчетной модели облака величины φ_r в случае электрического пробоя воздушного промежутка в системе «грозное облако–земля» (см. рисунок) минимальной длиной $l_c = (H_0 - R_0)$ для компенсации убыли электрического потенциала φ_R на наружной поверхности грозового облака к ней из внутренних зон этого грозового облака с более высоким электрическим потенциалом $\varphi_r > \varphi_R$ будут самопроизвольно в автоматическом режиме подтекать электрические заряды (в рассматриваемом на рисунке случае – свободные электроны). Именно эти заряды при

наличии высокопроводящего плазменного канала длинного воздушного искрового разряда между грозовым облаком и землей и будут пополнять в нем носители импульса электрического тока $i_L(t)$ линейной молнии.

Численная оценка по (3) и (4) электрических потенциалов внутри и снаружи рассматриваемого грозового облака при $q_\Sigma \approx -43,8$ Кл и $R_0 \approx 895$ м показывает, что в этом случае искомые величины по модулю становятся примерно равными: $\varphi_0 \approx 659$ МВ, а $\varphi_R \approx 439$ МВ. Из известных на сегодня количественных данных для электрического потенциала φ_r грозового облака можно указать лишь его численное значение примерно в 100 МВ, приведенное в [13]. Для проверки достоверности (верификации) полученного по (4) расчетного значения электрического потенциала $\varphi_R \approx 439$ МВ заряженной сферы рассматриваемого грозового облака используем численную оценку значения напряженности E_R электростатического поля вблизи его наружной сферической поверхности ($r \approx R_0$). С одной стороны, для оценки уровня напряженности E_R можно воспользоваться приближенным соотношением следующего вида:

$$E_R \approx \varphi_R / R_0. \quad (5)$$

В этом случае из (5) при $\varphi_R \approx 439$ МВ и $R_0 \approx 895$ м следует, что $E_R \approx 490$ кВ/м. С другой стороны, для нахождения в исследуемом электростатическом случае величины напряженности E_R с учетом теоремы Остроградского-Гаусса применим более точное соотношение, имеющее вид [12]:

$$E_R = \sigma_0 / \epsilon_0, \quad (6)$$

где $\sigma_0 = q_\Sigma / (4\pi R_0^2)$ – эквивалентная плотность электрического заряда на наружной поверхности сферы рассматриваемого грозового облака расчетным радиусом R_0 .

Из (6) при $q_\Sigma \approx 43,8$ Кл и $R_0 \approx 895$ м для E_R получаем, что $E_R \approx 491$ кВ/м. Видно, что оба приведенных для искомого напряженности E_R численных значения практически полностью совпадают. В этой связи можно говорить о работоспособности расчетных соотношений (1) и (4), определяющих в принятой модели грозового облака суммарный заряд q_Σ и электрический потенциал φ_R наружной сферической поверхности исследуемого облака. Что касается радиального распределения в грозовом облаке напряженности E_r электростатического поля, то оно определяется выражением вида [5, 12]:

$$E_r = q_\Sigma r / (4\pi\epsilon_0 R_0^3). \quad (7)$$

Согласно (7) при $r = 0$ напряженность $E_r|_{r=0} = E_0$ в центре исследуемого грозового облака оказывается равной нулю. При $r = R_0$ искомая напряженность по (7) принимает значение $E_r|_{r=R_0} = E_R$, описываемое (6). Поэтому значение E_R по (6) оказывается наибольшим в радиальном распределении напряженности E_r электростатического поля в сферическом объеме V_0 рассматриваемого мелкодисперсного грозового облака. Приведенные данные для радиального распределения напряженности E_r электростатического поля в отрицательно заряженном грозовом облаке однозначно указывают на то, что в случае однородного характера пространственного изменения носителей электричества в его сферическом объеме V_0 развитие электронных лавин [4, 13], являющихся предвестником возникновения в сверхвысоковольтной электростатической системе «грозное облако–земля» электрического пробоя длинного воздушного промежутка (появления молнии), будет всегда начинаться с наружной поверхности или края облака. Полученное по (5) расчетное значение напряженности $E_R \approx 490$ кВ/м при принятых атмосферных условиях приближается к критическому значению напряженности электрического поля, соответствующему предпробивной стадии электрофизических процессов в длинном воздушном промежутке $l_c = (H_0 - R_0)$ электростатической системы «грозное облако–земля» [4, 14].

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ W_0 ГРОЗОВОГО ОБЛАКА

При оценке электрической энергии W_0 , запасаемой в рассматриваемой трехфазной мелкодисперсной системе «грозное облако–земля», примем, что электрический потенциал φ_E плоской поверхности земли неограниченных геометрических размеров в пределе приближается к своему нулевому значению ($\varphi_E \approx 0$) [4]. В общем же случае для оценки численных значений электрической энергии W_0 исследуемого грозового облака можно использовать следующее расчетное соотношение:

$$W_0 \approx 0,5C_E U_0^2, \quad (8)$$

где $C_E \approx q_\Sigma / U_0$ – эквивалентная емкость сверхвысоковольтной системы «грозное облако–земля»; $U_0 \approx (\varphi_R - \varphi_E)$ – разность электрических потенциалов наружной сферической поверхности грозового облака, ограниченной радиусом R_0 , и плоской неограниченной

поверхности земли.

С учетом принятых допущений выражение (8) существенно упрощается и принимает следующий окончательный расчетный вид для электрической энергии W_0 в грозовом облаке:

$$W_0 \approx 0,5q_\Sigma \varphi_R. \quad (9)$$

Из (9) при $q_\Sigma \approx -43,8$ Кл и $\varphi_R \approx -439$ МВ находим, что в рассматриваемом случае величина запасаемой электрической энергии W_0 в сверхвысоковольтной электростатической мелкодисперсной системе «грозное облако–земля» численно составляет около $W_0 \approx 9,61 \times 10^9$ Дж. Отметим, что численные данные величины электрической энергии W_0 для грозового облака любой геометрической формы тропосферы Земли в литературных источниках на сегодня отсутствуют. Найденное численное значение электрической энергии W_0 позволяет оценить расчетную удельную электрическую энергию $w_{0V} = W_0 / V_0$, запасаемую исследуемым грозовым облаком. Так, при $W_0 \approx 9,61 \times 10^9$ Дж и $V_0 \approx 3 \times 10^9$ м³ искомое значение величины w_{0V} будет численно составлять примерно $w_{0V} \approx 3,2$ Дж/м³. Исходя из полученного численного значения для w_{0V} , при известных геометрических размерах реального грозового облака и соответственно занимаемом им объеме V_r можно в первом приближении оценить запасаемую в нем электрическую энергию W_r по следующему расчетному выражению: $W_r \approx w_{0V} \times V_r$.

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА АВП ИМПУЛЬСНОГО ТОКА $i_L(t)$ В КАНАЛЕ ДЛИННОГО ВОЗДУШНОГО ИСКРОВОГО РАЗРЯДА ГРОЗОВОГО ОБЛАКА НА ЗЕМЛЮ

С этой целью используем классический электротехнический подход, характерный для анализа электромагнитных процессов в электрической цепи со сосредоточенными RLC-параметрами [15]. Вначале оценим численное значение индуктивности L_c прямолинейного цилиндрического плазменного канала молнии наибольшим радиусом r_{mc} при электрическом искровом разряде грозового облака на землю в длинном воздушном промежутке наименьшей длиной $l_c \approx (H_0 - R_0)$ по формуле [16]:

$$L_c \approx (2\pi)^{-1} \mu_0 l_c [\ln(2l_c / r_{mc}) - 1], \quad (10)$$

где $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная [9].

Из (10) при $H_0 \approx 3000$ м, $R_0 \approx 895$ м, $l_c \approx (H_0 - R_0) \approx 2105$ м и $r_{mc} \approx 20 \times 10^{-3}$ м [17] следует, что в рассматриваемом случае сосредоточенная индуктивность L_c канала длинного

воздушного искрового разряда грозового облака на землю будет принимать численное значение, равное $L_c \approx 4,74 \times 10^{-3}$ Гн. При оценке численного значения активного сопротивления R_c цилиндрического канала грозового воздушного разряда будем исходить из того, что погонное активное сопротивление R_{c0} исследуемого сильноточного канала, согласно расчетно-экспериментальным данным из [17], для повторной импульсной D -компоненты тока искусственной молнии отрицательной полярности амплитудой $I_{mD} \approx -92,3$ кА, соответствующей времени $t_{mD} \approx 15$ мкс, численно составляет около $R_{c0} \approx 0,92$ Ом/м. Тогда для активного сопротивления R_c канала грозового разряда исследуемого облака на землю (см. рисунок) находим, что $R_c \approx R_{c0} \times L_c \approx 1,93 \times 10^3$ Ом. Из полученных расчетных данных следует, что в исследуемом электрофизическом случае для указанных электрических параметров $R_c \approx 1,93 \times 10^3$ Ом, $L_c \approx 4,74 \times 10^{-3}$ Гн и $C_E \approx q_S / \varphi_R \approx 10^{-7}$ Ф рассматриваемой сверхвысоковольтной разрядной цепи в системе «грозовое облако–земля» выполняется неравенство вида: $R_c > 2(L_c / C_E)^{1/2}$. А это означает, что в плазменном канале грозового разряда будет протекать аperiodический импульс тока $i_L(t)$ линейной молнии [15, 17]. В этой связи для определения АВП импульсного тока $i_L(t)$ в канале длинного электрического искрового разряда грозового облака на землю (в защищаемый от молнии объект) можно использовать соотношение вида [15, 17]:

$$i_L(t) = \varphi_R [(\alpha_2 - \alpha_1)L_c]^{-1} \times \times [\exp(-\alpha_1 t) - \exp(-\alpha_2 t)], \quad (11)$$

где α_1, α_2 – коэффициенты формы аperiodического импульсного тока грозового разряда (молнии), соответственно равные $\alpha_1 = \delta - (\delta^2 - \omega_0^2)^{1/2}$ и $\alpha_2 = \delta + (\delta^2 - \omega_0^2)^{1/2}$; $\delta = R_c / (2L_c)$ – коэффициент затухания импульсного тока линейной молнии; $\omega_0 = (L_c C_E)^{-1/2}$ – собственная круговая частота импульсного разрядного тока в электрофизической дисперсной системе «грозовое облако–земля».

Время t_{mL} , соответствующее амплитуде I_{mL} импульсного тока $i_L(t)$ грозового разряда по (11), может быть определено по известному в электротехнике аналитическому соотношению вида [15]:

$$t_{mL} = \ln(\alpha_2 / \alpha_1) / (\alpha_2 - \alpha_1). \quad (12)$$

Используя (11) и (12), для расчетных исходных данных $R_c \approx 1,93$ кОм, $L_c \approx 4,74$ мГн и $C_E \approx 100$ нФ получаем, что в рассматриваемом нами случае: $\delta \approx 2,03 \times 10^5$ с⁻¹; $\omega_0 \approx 45,93 \times 10^3$ с⁻¹;

$\alpha_1 \approx 5 \times 10^3$ с⁻¹; $\alpha_2 \approx 4,01 \times 10^5$ с⁻¹; $t_{mL} \approx 11,1$ мкс. Заметим, что найденный расчетным путем временной параметр t_{mL} хорошо согласуется с требованиями указанного выше международного стандарта IEC 62305-1: 2010, характерными для аperiodического импульса тока временной формы 10 мкс/350 мкс короткого удара молнии в наземные объекты промышленной энергетики [10, 11]. Тогда, согласно (11), при $\varphi_R \approx -439$ МВ, $L_c \approx 4,74$ мГн и $t = t_{mL} \approx 11,1$ мкс расчетное значение амплитуды I_{mL} импульса тока $i_L(t)$ линейной молнии для исследуемого случая ($\delta \approx 2,03 \times 10^5$ с⁻¹; $\omega_0 \approx 45,93 \times 10^3$ с⁻¹; $\alpha_1 \approx 5 \times 10^3$ с⁻¹; $\alpha_2 \approx 4,01 \times 10^5$ с⁻¹) будет численно составлять $I_{mL} \approx -218,5$ кА. Полученное значение для амплитуды I_{mL} аperiodического импульса тока $i_L(t)$ в канале длинного воздушного искрового разряда грозового облака на землю (в защищаемый от грозовых разрядов технический объект) хорошо коррелирует с АВП импульсного тока $i_L(t)$, соответствующими коротким ударам линейной молнии в наземные объекты электроэнергетики и удовлетворяющими I уровню их молниезащиты ($I_{mL} = -(200 \pm 20)$ кА) по требованиям действующего международного стандарта IEC 62305-1: 2010 [10, 11]. Что касается расчетного значения длительности τ_p аperiodического импульса тока $i_L(t)$ линейной молнии на уровне $0,5 I_{mL}$, то она для исследуемого случая оказывается приблизительно равной $\tau_p \approx 0,76 R_c C_E \approx 147$ мкс. Практически аналогичное значение временного параметра τ_p (с расхождением в пределах 3%) при $\alpha_1 \approx 5 \times 10^3$ с⁻¹ следует и из известной в области высоковольтной импульсной техники зависимости следующего вида [3, 17]: $\tau_p \approx 0,76 / \alpha_1 \approx 152$ мкс.

Полученные данные позволяют уточнить сделанный нами предварительный выбор численного значения радиуса $r_{mc} \approx 20$ мм плазменного канала воздушного грозового искрового разряда на землю. С учетом принятых допущений и формулы Брагинского для расчетной оценки наибольшего радиуса r_{mc} плазменного канала воздушного искрового разряда (молнии) можно использовать соотношение [14, 17]:

$$r_{mc} = 0,093 (|I_{mL}|)^{1/3} (t_{mL})^{1/2}. \quad (13)$$

Из (13) при $|I_{mL}| \approx 218,5$ кА и $t_{mL} \approx 11,1$ мкс получаем, что уточненное численное значение для радиуса r_{mc} канала мощного воздушного искрового разряда в исследуемой мелкодисперсной системе «грозовое облако–земля» будет составлять $r_{mc} \approx 18,7$ мм. Видно, что расхождение этого уточненного численного значения наибольшего радиуса r_{mc} прямолинейного

плазменного канала линейной молнии с его предварительно принятым нами численным значением $r_{mc} \approx 20$ мм не превышает 7%.

Таким образом, представлены результаты расчетной оценки рассмотренных основных электрофизических характеристик для исследуемой природной мелкодисперсной системы «грозовое облако–земля», в которой реальное грозовое облако произвольного объема V_r предварительно приведено к эквивалентной сферической форме расчетным радиусом $R_0 \approx (3V_r / 4\pi)^{1/3}$ своего прежнего объема $V_0 = V_r = 4\pi R_0^3 / 3$. Показано, что при минимальной исходной метеорологической информации и ограниченных данных об электромагнитной обстановке в зоне формирования и развития в земной тропосфере указанного грозового облака (фактически только по степени его грозовой «зрелости» – значению в нем объемной плотности электрического заряда σ_V и его ориентировочным габаритным геометрическим размерам – занимаемому объему V_r и высоте H_0 размещения центра облака над поверхностью земли) можно оперативно рассчитать рассмотренные основные электрофизические характеристики исследуемого грозового облака. Кроме того, достаточно аргументированно в первом приближении можно оценить грозовую опасность для защищаемых от молнии объектов наземной промышленной инфраструктуры и пребывающих в тропосфере Земли летательных аппаратов, а также спрогнозировать дальнейшее развитие грозовой «картины» в окружающей атмосферной среде с защищаемыми наземными и воздушными объектами и исследуемой сверхвысоковольтной электрофизической системой «грозовое облако–земля».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен новый подход к инженерному расчету основных электрофизических характеристик для упрощенной модели трехфазной дисперсной системы «грозовое облако–земля», содержащей взвешенные в газообразной атмосферной фазе электрически заряженные в теплых восходящих воздушных потоках тропосферы Земли мелкие круглые жидкие капли воды и мелкие круглые твердые диэлектрические частицы. Эти характеристики включают: накопленный в облаке суммарный электрический заряд q_Σ ; усредненную в облаке объемную плотность электрического заряда σ_V ; возникающий в облаке электрический потенциал ϕ_r ; запасаемую облаком электрическую энергию W_0 ; удельную электрическую энергию в облаке w_{0V} ; АВП

импульсного тока $i_L(t)$ линейной молнии в плазменном канале длинного воздушного электрического искрового разряда облака на землю (в защищаемый от молнии технический объект). Для ряда указанных характеристик полученные расчетные данные соответствуют известным экспериментальным результатам и техническим требованиям действующего международного стандарта ИЕС 62305-1: 2010 для коротких ударов линейной молнии в наземные объекты промышленной инфраструктуры.

2. Для используемой упрощенной расчетной модели трехфазной дисперсной системы с грозовым облаком сферической формы радиусом $R_0 \approx 895$ м и объемом $V_0 \approx V_r \approx 3 \times 10^9$ м³ при высоте $H_0 \approx 3000$ м его размещения над плоской поверхностью земли показано, что при выбранных исходных количественных параметрах принятых жидких и твердых микровключений ($r_w \approx r_d \approx 5$ мкм; $N_w \approx 10^8$ м⁻³; $N_d \approx 5 \times 10^6$ м⁻³) искомые значения указанных электрофизических характеристик исследуемой системы по модулю численно составляют: полный электрический заряд облака – $q_\Sigma \approx 43,8$ Кл; усредненная объемная плотность в облаке электрического заряда – $\sigma_V \approx 1,46 \times 10^{-8}$ Кл/м³; электрический потенциал наружной поверхности облака – $\phi_R \approx 439$ МВ; электрическая энергия облака – $W_0 \approx 9,61$ ГДж; удельная электрическая энергия в облаке – $w_{0V} \approx 3,2$ Дж/м³; амплитуда импульса тока линейной молнии в канале длинного воздушного электрического искрового разряда облака на землю – $I_{mL} \approx 218,5$ кА, соответствующая времени $t_{mL} \approx 11,1$ мкс. Эти приближенные расчетные количественные данные для указанных электрофизических характеристик атмосферного электричества наглядным образом демонстрируют нам огромную электрическую силу и мощь, накапливаемую естественным путем в тропосфере Земли трехфазным мелкодисперсным грозовым облаком сферической формы средних геометрических размеров ($R_0 \approx 895$ м).

3. Показано, что для используемой объемной плотности $N_d \approx 5 \times 10^6$ м⁻³ электрически заряженных круглых твердых диэлектрических частиц радиусом $r_d \approx 5$ мкм их влиянием на протекание электрофизических процессов в грозовом облаке, содержащем также электрически заряженные круглые жидкие капли воды с рассматриваемыми параметрами ($r_w \approx 5$ мкм; $N_w \approx 10^8$ м⁻³), можно пренебрегать.

4. Полученные результаты будут способствовать возможности выполнения инженерами и метеорологами расчетной оценки грозовой опасности для промышленной инфраструктуры

(например, объектов электроэнергетики, магистральных подземных нефте- и газопроводов с их наземными перекачивающими станциями) и прогнозирования в первом приближении электромагнитной обстановки в том или ином географическом районе нашей планеты с активной грозовой деятельностью в процессе формирования и развития в земной тропосфере реального грозового облака с усредненной объемной плотностью электрического заряда σ_V его мелкодисперсных включений, предварительно приведенного по величине занимаемого им объема V_r к расчетному грозовому облаку сферической формы эквивалентным радиусом $R_0 \approx (3V_r / 4\pi)^{1/3}$ и объемом $V_0 = V_r = 4\pi R_0^3 / 3$ с прежней объемной плотностью σ_V своего распределенного электрического заряда отрицательной (положительной) полярности.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Uman, M.A., Natural and artificially-initiated lightning and lightning test standards, *Proc. IEEE*, 1988, vol. 76, no. 12, p. 1548. <https://doi.org/10.1109/5.16349>.
2. Базелян, Э.М., Райзер, Ю.П., *Физика молнии и молниезащита*. М.: Физматлит, 2001. 319 с.
3. Кужекин, И.П., Ларионов, В.П., Прохоров, Е.Н., *Молния и молниезащита*. М.: Знак, 2003. 330 с.
4. Бортник, И.М., Белогловский, А.А., Верещагин, И.П., Вершинин, Ю.Н., и др., *Электрофизические основы техники высоких напряжений: Учебник для ВУЗов*. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. 704 с.
5. Baranov, M.I., New hypothesis and electrophysics nature of additional mechanisms of origin, accumulation and division of electric charges in the atmospheric clouds of Earth, *Electr. Eng. Electromechan.*, 2018, no. 1, p. 46. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.1.07>.
6. <http://www.astronet.ru/db/msg/1244664> (accessed 15 July 2012).
7. Baranov, M.I., Power descriptions of a storm cloud of troposphere of Earth: features of their calculation and applied utilization, *Electr. Eng. Electromechan.*, 2018, no. 3, p. 37. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.3.05>.
8. Нигматулин, Р.И., *Основы механики гетерогенных сред*. М.: Наука, 1978. 336 с.
9. Кузьмичев, В.Е., *Законы и формулы физики*. Киев: Наукова думка, 1989. 864 с.
10. *Protection against lightning. Part 1: General principles*. IEC 62305-1: 2010. Geneva: IEC Publ., 2010. 72 p.
11. Baranov, M.I., Koliushko, G.M., Kravchenko, V.I. and Rudakov, S.V., A generator aperiodic current pulses of artificial lightning with a rationed temporal form of 10/350 μ s with an amplitude of $\pm (100-200)$ kA, *Instrum. Experim. Techniques*, 2015, vol. 58, no. 6, p. 745. <https://doi.org/10.1134/S0020441215060032>.
12. Яворский, Б.М., Детлаф, А.А., *Справочник по физике*. М.: Наука, 1990. 624 с.
13. Бржезицкий, В.О., Білий, І.В., Бойко, М.І., Гуль, В.І., и др., *Техніка і електрофізика високих напруг: Навчальний посібник*. Харків: НТУ «ХП» – Торнадо, 2005. 930 с.
14. Райзер, Ю.П., *Физика газового разряда*. М.: Наука, 1987. 592 с.
15. Нейман, Л.Р., Демирчян, К.С., *Теоретические основы электротехники: Учебник для вузов в 2 томах. Том 1*. Л.: Энергоиздат, 1981. 536 с.
16. Кнопфель, Г., *Сверхсильные импульсные магнитные поля*. М.: Мир, 1972. 391 с.
17. Баранов, М.И., *Избранные вопросы электрофизики. Монография в 4 томах. Том 3: Теория и практика электрофизических задач*. Харьков: Точка, 2014. 400 с.

Summary

The results of engineering calculation of basic electrophysical characteristics of a three-phase dispersed system of the Earth troposphere “storm cloud-earth”, in the cloud of which a bearing gaseous air phase contains fine liquid water drops and small solid dielectric particles, are presented. The indicated characteristics are as follows: the total electric charge q_Σ concentrated in a storm cloud of a given spherical volume V_0 with finely dispersed charged inclusions in the form of water droplets of the radius r_w and solid dielectric particles of the radius r_d with the given corresponding average volume densities N_w and N_d , respectively; the electric potential ϕ_r in the spherical volume V_0 of a storm cloud with a specified outer radius R_0 ; the electrical energy W_0 accumulated in the volume V_0 of a storm cloud with finely dispersed inclusions; and the amplitude and temporal parameters of the pulse current $i_L(t)$ of the lightning in the plasma channel of a long air spark electrical discharge from the storm cloud to the ground. It is shown that at $r_w \approx r_d \approx 5 \mu\text{m}$, $N_w \approx 10^8 \text{ m}^{-3}$, $N_d \approx 5 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$, $R_0 \approx 895 \text{ m}$ and the height of the center of a spherical storm cloud (with its volume of $V_0 \approx 3 \times 10^9 \text{ m}^3$) $H_0 \approx 3000 \text{ m}$ above the ground level, the following numerical values (in modulus) of the sought parameters of the system under consideration could be obtained: the accumulated cloud charge of $q_\Sigma \approx 43.8 \text{ C}$; the electric potential on the outer cloud surface of $\phi_R \approx 439 \text{ MV}$; the electric energy of $W_0 \approx 9.61 \text{ GJ}$; the amplitude of the lightning current of $I_{mL} \approx 218.5 \text{ kA}$ corresponding to the time $t_{mL} \approx 11.1 \mu\text{s}$. The obtained results are in a good agreement with known experimental data related to the atmospheric electricity. They will contribute to a possibility of predicting thunderstorm conditions in the Earth troposphere with the minimal initial meteorological information, the further development of the nature of the atmospheric electricity, the physics of the linear lightning and solving the problem of the lightning protection of air and ground facilities and their personnel.

Keywords: electrical charge, potential and energy of storm cloud, current of discharge of storm cloud on earth, lightning, calculation